

近年來大氣環流研究發展概況

張隆男

國立中央大學物理系

一、前言

大氣環流的研究，追溯至Halley與Hadley時代，已有將近三百年的歷史。這中間隨着力學（流體力學）及數學的逐步發展，大氣觀測的日漸普遍精密以及計算工具的日益發達，人類對大氣環流的基本認識也有長足的進步。

Lorenz (1967) 對這段歷史性的發展有極詳細而精采的描述，同時對至1967年為止，有關大氣環流理論及觀測或實驗的結果也有詳盡的介紹。因此之故，本文所討論的範圍將以1967年以後的研究發展為主。同時大氣環流研究所涵蓋的範圍太廣，我們將只討論最近十多年來較重要的幾項發展。

二、大氣環流理論的進展

大氣環流包含了各種不同尺度的大氣運動，而任何一種大氣環流模式，不論是物理的或數學的，其所能描述的現象祇是一種經過某種方式濾波後的平均狀態。為了表示那些被忽略的較小尺度運動對平均狀態的影響，大氣模式必需作所謂的收束假設 (Closure assumption)，亦即將比較小尺度運動及其對熱量、動量、水汽等的輸送效應加以參數化處理。

Starr (1973) 以收束假設的處理方式來分別歷史上大氣環流理論進展的三個階段：

(1) 早期的軸對稱環流模式

此種模式只考慮了緯向平均環流及其相關的平均子午環流。其他各種波動變化就被包含在收束假設中，視為無關緊要，或當成正的渦流粘滯 (eddy viscosity) 處理。在這樣的模式中，渦流的角色祇在消耗子午平均環流的動能，與隨後觀測到的事實

顯然不符。

(2) 準地轉模式 (Charney and Phillips, 1953)

在此模式中，非地轉風在許多場合被忽略。而觀察到的移動性渦流所扮演的水平反梯度動量傳遞的角色，亦即所謂負粘滯係數觀念可以用此種模式成功的描述出來。但是隨後的觀測事實顯示 (Starr, 1973)，長期平均下來，大氣垂直方向的負粘滯係數 (由邊界層向上層噴射氣流輸送動量) 與水平方向的負粘滯係數同樣重要。而準地轉模式對垂直動量的輸送估計却遠不如水平動量輸送重要。

(3) 原始方程模式

現代的大氣環流理論逐漸改成原始方程模式。此種模式使收束假設減至最低的程度，因此，此種模式允許將垂直的渦流係數正確的描述出來。此種模式如何考慮小於網格尺度的收束假設問題，是今後研究的重點。

最近的研究顯示 (Wallace, 1978)，大氣大規模移動渦流 (transient eddies) 對長時間緯向平均環流 (zonally averaged time mean circulation) 的維持極為重要。但此種移動渦流對區域性的時間平均環流的維持並不重要。根據Namias and Clapp (1949) 的理論，區域性的時間平均環流主要是靠平均流來維持。Holopainen (1978) 及Lau (1979) 對中緯度長時間資料的分析，似乎也證實了這個說法。

三、大氣能量的波譜分佈

Wiin-Nielsen (1967), Julian et al., (1971) 由大氣運動的診斷分析得出波數在8與15

之間的能量分佈滿足 -3 乘方律，同時由二維的準地轉亂流理論研究，Kraichnen (1967)，Leith (1968)，Chareny (1976) 也得出大氣存在有 -3 乘方律的慣性次程 (inertial subrange)。最近Chen (1980) 及Chen and Tribbia (1981) 分析了熱帶資料，顯示旋性風 (Rotational wind) 在波數8與18之間滿足 -3 乘方律，但輻散風 (divergent wind) 則滿足 -2 乘方律。

四、非線性交互作用

由觀測事實顯示，由斜壓不穩定引發的氣旋波供應中緯度大氣的能量，而緯流波數為1的波則為熱帶地區波動能量的主要來源 (Kanamitsu et al., 1972)。Steinberg et al., (1971) 及 saltzman (1970) 的結果均顯示中緯度地區的動能係由綜觀尺度的波動向較大及較小的波長方向輸送。Kanamitsu et al., (1972) 分析1967年夏季200mb資料，發現動能係由波數1向較小波輸送。

對於渦涵 (enstrophy) 而言，在中緯度係由波數小的波向大波數輸送 (Steinberg et al., 1971) 在赤道地區，以1967年及1972年夏天200mb資料計算，Chen and Tribbia (1980) 發現波數1與7的波均喪失渦涵，並分兩個波段向波數較大的波輸送。

Loesch (1974), Loesh and Domaracki (1977) 以準地轉無摩擦二層模式討論數個斜壓波之間的非線性作用。其初始條件設其中一個斜壓波為不穩定波，其他的波則處於臨界穩定狀態。此模式的目的是在研究長時間積分後，線性不穩定與非線性交互作用是否分離或共存的問題。他們指出，兩者分離的條件決定於(1)大氣之佛羅德數 (Froude number)，(2)風切大小，(3)波動之原始振幅及(4)波的數目。在可以分離的情況下 (例如波數在5~7之間， $\pi^2/\sqrt{2} < Fr < 10.5$ 時) 有利於平均流與各波間之能量交換。此時非線性的作用可以用加成法討論。在不能分離時，則需考慮共振的效應

，此時有利於波與波間之能量交換。

對於波與平均流間之交互作用的問題，最近Holton (1975)，Boyd (1976) 及Andrews and McIntyre (1976) 提出了所謂不交互作用理論。這個理論大意是說，當波動本身振幅不生變化或是沒有外力的強合作用 (機械力或熱力) 或摩擦消散，則波動將不會與平均流發生交互作用，亦即它們的存在並不會使平均流的速度增減。

對於波與波間之交互作用，Gall (1976)，Gallet et al., (1979) 強調不規則分佈的氣旋波對超長波的強制共振作用，Hansen and Chen (1981) 作阻塞高壓的診斷分析，也證實了強烈發展的氣旋波確實對超長波的發展以及隨後的高壓阻塞有重要之影響。

五、海洋與大氣交互作用對大氣環流的影響

海洋一直被認為是一重要的能量儲藏室，對大氣環流具有重要的影響。過去十幾年來，海洋大氣之間的交互回饋作用，越來越受到重視。Bjerknes (1966, 1969) 指出，熱帶太平洋海水表面溫度 (SST) 的異常分佈可能引起貿易風強度與哈德萊環流強度的變化，其結果則可能影響了中緯度環流的異常現象。最近Namias (1978) 的研究顯示，太平洋東西溫度異常，加強了大氣的斜壓性，且增強了上層的南風。這異常的南風不祇能影響局部的環流形態，同時也可能影響了下游的環流及北美洲的天氣形態。Ratcliffe and Murray (1970) 也發現了大西洋與西歐間之回饋作用。其研究顯示，在紐芬蘭 (Newfound land) 南方大範圍的海面負溫度異常，與下個月北歐與西歐的大氣阻塞有關，而同一區域正的SST異常則有利於順暢的天氣形態。

Namias (1970) 指出，雖然大氣與洋面之間的交互作用不斷在進行，但SST異常一旦出現就可以持續一段時間。同時SST異常固然可以影響下游或數日後之大氣環流，但大規模SST異常本身則往往是大氣環流驅動的結果。因此，研究海洋與

大氣交互作用需把海洋與大氣系統看成一整體。

近年來大氣環流模式(GCM)常被用來研究異常 SST 對大氣環流的影響。例如 Rowntree (1972) 的 GFDL 模式, Spar (1973 a, b) 及 Spar and Atlas (1975) 使用 GISS 模式。Shukla and Bangaru, (1979) 使用 GLAS 模式(前身為 GISS)。NCAR GCM 也廣泛的被用來研究 SST 的影響, 例如 Houghton et al., (1974), Chervin et al. (1976) Kutzback et al. (1977), Chervin et al. (1980) 等等。這些模式對 SST 的影響有不同程度的反應。其中較突出的應推 Shukla and Bangaru (1979) 的實驗。他們以 GLAS (Goddard Laboratory for Atmospheric Science) 模式來試驗海水溫度異常對 1976~1977 年冬天大氣環流的影響。首先海水溫度採用氣候平均值, 另一個實驗則加上 1976—1977 年冬天的 SST 異常值。模式對此異常的 SST 的反應主要表現在長波上。最大的變化在於北美洲的西岸與西歐出現了持續性的阻塞高壓。為了瞭解這兩個持續阻塞高壓的出現與維持的機制, Chen and Shukla (1981) 進一步分析了長波對 SST 的反應及其能量變化。他們的實驗證實, SST 異常可以造成超長波的駐留, 滿足 Tung and Lindzen (1979) 的共振條件, 從而發生阻塞高壓的現象。

六、後 記

本文在匆促之中寫成, 不及廣搜有關文獻, 難免有許多錯誤與疏漏之處, 尚祈諸位先進不吝指教。又有關大氣環流模式及熱帶大氣環流之介紹, 因國內最近已有評介專集問世, 故不再贅述, 請參考蔡清彥, 陳泰然教授主編「紀念馮融華博士氣象評介論文集」有關論文。

參考文獻

Andrews, D. G. and M. E. McIntyre, 1976:
Planetary waves in horizontal and vertical

shear: the generalized Eliassen-Palm relation and the zonal mean acceleration. *J. Atmos. Sci.*, 33, 2031-2048.

Bjerknes, J., 1966: A possible response of the atmospheric Hadley circulation to equatorial anomalies of ocean temperature. *Tellus*, 18, 820-829.

—, 1969: Atmospheric teleconnections from the equatorial Pacific. *Mon. Wea. Rev.*, 97, 163-172.

Boyd, J. P., 1976: The noninteraction of waves with the zonally averaged flow on a spherical earth and the interrelationships of eddy fluxes of energy, heat and momentum. *J. Atmos. Sci.*, 33, 2285-2291.

Charney, J. G. & Phillips, N. A. 1953. Numerical integration of the quasi-geostrophic equations of motion for barotropic and simple baroclinic flows. *J. Meteor.* 10, 71-99.

Chen, T.-C. 1980. On the energy exchange between the divergent and rotational components of atmospheric flow over the tropics and subtropics at 200 mb during two northern summers. *Mon. Wea. Rev.*, 108, 896-912.

Chen, T.-C. and J. Shukla, 1981: Spectral energetics of ultralong waves and blocking ridges generated in the GLAS atmospheric model the SST anomaly in the North Pacific Ocean.

Chen, T.-C. and Joseph J. Tribbia, 1980: On nonlinear cascades of enstrophy over the tropics at 200 mb during two Northern Hemisphere summers. *Mon. Wea. Rev.*, 108, 913-921.

Chen, T.-C. and Joseph J. Tribbia, 1981:

- Kinetic energy spectra of divergent wind in the atmosphere. *Tellus*, 33, 102-104.
- Chervin, R. M., W. M. Washington and S. H. Schneider, 1976 : Testing the statistical significance of the response of the NCAR general circulation model to North Pacific Ocean surface temperature anomalies. *J. Atmos. Sci.*, 33, 413-423.
- , J. E. Kutzbach, D. D. Houghton and R. G. Gallimore, 1980 : Response of the NCAR general circulation model to prescribed changes in ocean surface temperature. Part II : Midlatitude and subtropical changes. *J. Atmos. Sci.*, 37, 308-332.
- Gall, R. L., 1976 : The role of released latent heat in growing baroclinic waves. *J. Atmos. Sci.*, 33, 1686-1701.
- Gall, R., R. Blakeslee, and R. C. J. Somerville, 1979 : Cyclone-scale forcing of ultralong waves. *J. Atmos. Sci.*, 36, 1692-1698.
- Anthony R. Hansen and Tsing-Chang Chen, 1981 : Spectral energetics analysis of atmospheric blocking. pp. 1-38 (submitted to *Mon. Wea. Rev.*).
- Holopainen, E. 1978. A diagnostic study of the kinetic energy balance of the long-term mean flow and the associated transient fluctuations in the atmosphere. *Geophysica*, 15, 125-145.
- Holton, J. R., 1975 : The dynamic meteorology of the stratosphere and mesosphere. *Met. Monogr. No. 37*. Amer. Meteorol. Soc., Boston.
- Houghton, D. D., J. E. Kutzbach, M. McClintock and D. Suchman, 1974 : Response of a general circulation model to a sea temperature perturbation. *J. Atmos. Sci.*, 31, 857-868.
- Julian, P. R., W. M. Washington, L. Hembree and C. Ridley, 1970: *J. Atmos. Sci.*, 27, 376-387.
- Kanamitsu, M., T. N. Krishnamurti and C. Depradine, 1972 : On scale interactions in the tropics during northern summer. *J. Atmos. Sci.*, 29, 698-705.
- Kraichnan, R. H. 1967. Inertial subranges in two-dimensional turbulence. *Phys. Fluids* 10, 1417-1423.
- Kutzbach, J. E., R. M. Chervin and D. D. Houghton, 1977 : Response of the NCAR general circulation model to prescribed changes in ocean surface temperature. Part I : Midlatitude changes *J. Atmos. Sci.*, 34, 1200-1213.
- Lau, N.-C. 1979. The structure and energetics of transient disturbances in the Northern Hemisphere winter circulation. *J. Atmos. Sci.*, 36, 982-995.
- Leith, C. E. 1968. Diffusion approximation for two-dimensional turbulence. *Phys. Fluids* 11, 671-673.
- Loesch, A. Z., 1974 : Resonant interactions between unstable and neutral baroclinic waves. *J. Atmos. Sci.*, 31, 1177-1217.
- Lorenz, E. N., 1967 : On the nature and theory of the general circulation of the atmosphere. W. M. O. Geneva. 158pp.
- Namias, J, 1970 : Macroscale variations in sea-surface temperatures in the North Pacific. *J. Geophys. Res.*, 75, 565-582.
- , 1978 : Multiple causes of the North American abnormal winter 1976-1977.

Mon. Wea. Rev., 106, 279-295.

Namias, J. and P. F. Clapp. 1949. Confluence theory of the high tropospheric jet stream. J. Meteor., 6, 330-336.

Ratcliffe, R. A. S., and R. Murray, 1970: New lag association between North Atlantic sea surface temperatures and European pressure applied to long range forecasting. Quart. J. Roy. Meteor. Soc., 96, 226-246.